

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11546

研究課題名（和文）伝播波パラメータ分布に基づく多チャンネル表面筋電図による筋収縮メカニズムの解明

研究課題名（英文）Analysis of muscle contraction mechanism by multichannel surface electromyogram based on propagation wave parameter distribution

研究代表者

板倉 直明（Itakura, Naoaki）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：30223069

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：筋収縮は、運動ニューロンの興奮インパルスが目指す筋に伝えられて発生する。この時、骨格筋を構成する筋線維の筋電位は筋線維に沿って伝播するため、多チャンネル表面筋電図で、この伝播波を測定すれば、筋収縮メカニズムの考察が可能になる。本研究では、多チャンネル表面筋電図の測定に用いる電極形状の違いによる伝播波の特徴の違いを検討した。その結果、棒状電極に比べて円弧状電極で伝播波がえやすく、僅かに電極方向が異なると伝播波の特徴が異なることから、筋線維は筋肉全体で同じような収縮をしていないことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の表面筋電図解析では、筋収縮メカニズムを考察するために十分な解析結果が得られていなかったため、筋収縮メカニズムの考察が必要な分野において、筋電図解析を用いた研究が殆ど見受けられないのが現状となっている。

そこで、多くの研究者の興味に充分に対応できる新たな表面筋電図解析法を開発し、筋肉を構成する筋線維の組成を筋電図から明らかにし、筋収縮メカニズムの考察を可能とした。また、測定電極の形状や信号増幅方法なども検討し、応用分野で簡単に使えるようにすることで、スポーツやリハビリテーションなど多くの分野で筋肉トレーニング効果等を簡易に評価することが可能になる。

研究成果の概要（英文）：Muscle contraction occurs when the excitation impulses of motor neurons are transmitted to the target muscle. The potentials of the muscle fibers constituting skeletal muscle propagate along the muscle fibers. If this propagation wave is measured with a multi-channel surface electromyogram, it is possible to consider the muscle contraction mechanism. In this study, we investigated the difference in the characteristics of the propagation wave due to the difference in the electrode shape used for the measurement of multi-channel surface electromyogram. As a result, it was clarified that arc-shaped electrodes are easier to generate propagation waves compared to the rod-shaped electrodes, and muscle fibers do not contract in the same way throughout the entire muscle because the characteristics of the propagation waves differ slightly in the electrode direction.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：多チャンネル表面筋電図 筋収縮メカニズム 筋線維伝導速度

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 従来の筋電図解析における問題点

筋収縮は、 $\alpha$ 運動ニューロンの興奮インパルスが神経軸索を経て目指す筋に伝えられて発生する。この時、骨格筋を構成する筋線維の筋電位は、神経筋接合部での化学的作用により発生し、筋線維に沿って伝播する。従って、多チャンネル表面筋電図から、その伝播する波形（伝播波）を定量的に抽出すると同時に、抽出した全ての伝播波の特徴分布を調べることで、詳細な筋収縮メカニズムの考察が可能になる。

従来の表面筋電図解析は、多くは積分筋電図などの振幅情報解析や、パワースペクトルなどの周波数解析が主体であり、観測される筋電図から筋収縮メカニズムを考察するために十分な解析結果が得られていない。また、多チャンネル表面筋電図解析では、筋電図波形から得られる筋線維伝導速度 (MFCV) を求めることが主であり、その解析手法は相互相関関数などから求めたチャンネル間の時間差を用い、MFCV (=電極間距離/時間差) を求める手法が適用される。しかし、1)相互相関関数を適用する区間が定義されていない、2)相互相関関数だけでは波形伝播の保証がなく波形伝播の定義が必要である、3)計測する際のサンプリング周波数で計算される伝導速度の分解能が制限される(電極間5mmでサンプリング周波数5kHzの速度分解能→25.0, 12.5, 8.3, 6.3, 5.0(m/s), ...) ことから、伝播波形が正確に抽出されないうえに、生理学的に明らかにされている MFCV が得られる 3(m/s)~15(m/s)の範囲において、MFCV 分布などを充分に表現できないため、多くの研究者が興味を持っている収縮に関する筋線維組成を充分に考察することはできない。

以上のように、現在まで使用されてきた筋電図解析法は、多くの研究者が興味のある筋収縮メカニズムを考察するために十分な解析結果が得られていないため、最近では筋電図解析を行う研究は、従来の手法で十分な結果が考察できる研究領域に絞られ、その他の研究領域では、筋電図解析を用いた研究が殆ど見受けられないのが現状となっている。

そこで、多くの研究者の興味に充分に対応できる新たな表面筋電図解析法を開発することが重要であると考えた。特に表面筋電図解析で最も期待されていることは、筋肉を構成する筋線維の組成を筋電図から明らかにすることである。生理学的に筋線維は、筋電位の伝導速度に注目して、速筋線維と遅筋線維に区別される。筋肉に含まれる速筋線維と遅筋線維の割合を調べることは、筋肉の使い方や示す重要な指標であるため、スポーツ科学分野における筋肉トレーニング効果を客観的に評価する際など、簡単に得たい結果である。しかしながら、表面筋電図から直接的に筋線維の組成を評価できるような解析手法は存在せず、パワースペクトルの高周波成分が増えれば、収縮に関わる速筋線維が増えたと間接的に考察するだけで、具体的にどの程度の伝導速度を持った筋線維がどのくらい増えたかを議論することはできない。そこで、これらの問題点を解決するために新たに multi-channel 法 (以下、m-ch 法) を開発した。

### (2) m-ch 法

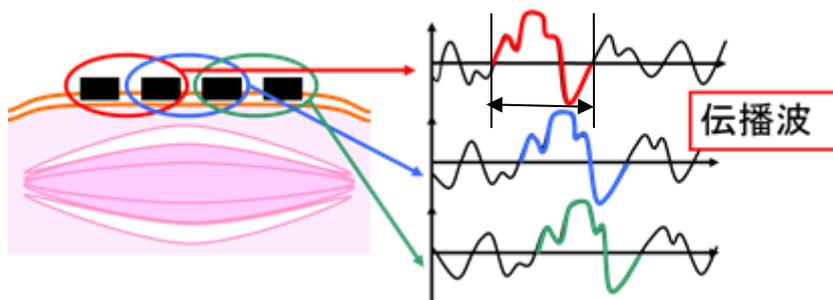


図1 多チャンネル表面筋電図の測定と得られる筋電図波形例

多チャンネル表面筋電図とは図1に示すように皮膚表面に貼った複数電極から、差動増幅によって雑音の少ない筋電図を複数チャンネルにより取得したものである。得られた多チャンネル表面筋電図は、波形が似ている部分（伝播波）がチャンネルごとにある時間差を持って得られる。従来の研究では、隣り合うチャンネルに対し、伝播波を任意に決定し、相互相関関数が最大となる時間差を求め、電極間距離/時間差=筋線維伝導速度 (MFCV) としていた。この方法では、伝播波の決定方法は観察者の主観や閾値以上の振幅が大きい部分など様々であり客観的な結果が得られない。また、伝播波とする波形区間が決められておらず、伝播波を定義する方法がない。さらに、多チャンネル表面筋電図は、電極下の多くの運動単位の干渉電位を電極間の差動増幅波形として観測しているため、MFCV は原理的に求められないなど種々の問題が存在する。

一方、多くの運動単位の干渉電位が多チャンネル表面筋電図で観測されているならば、その伝播波の伝播速度、振幅、波長に注目すれば、その伝播波を構成する多数の「干渉する運動単位の MFCV」は「伝播速度」に、「干渉する運動単位の数」は「振幅」に、「干渉する運動単位の空間

的な広さ」は「波長」に反映できる可能性が考えられた。

そこで、上述の問題点を解決するために考案されたのが **m-ch** 法である。筋電図波形の 2 点ゼロクロス単位（図中の矢印部分＝解析単位）ごとに、その波形が伝播しているかを定量的に定義し、伝播している場合は、それを伝播波として、プログラムで自動抽出するアルゴリズムを実装したものが **m-ch** 法である。この **m-ch** 法により、測定されたすべての筋電図波形から、伝播状態を定量的に定義することで、すべての伝播波が抽出されることになる。従って、前述した 1)、2)の問題点が解決できる。また、サンプリング定理から導かれるサンプリングデータから元のアナログ信号を近似する式を用いて、筋電図波形データを保持することで、サンプリング定理を満たすサンプリング周波数（測定信号が持つ最高周波数の 2 倍以上のサンプリング周波数を使う）でデータを得ていても、近似式からデータ補間するので、必要十分な速度分解能が得られ、3)の問題点も解決している。さらに、伝播状態を調べる対象が解析単位で波形を比較するだけなので、伝播波を抽出する計算量も大幅に減少できる。

### (3) **m-ch** 法を用いた筋収縮メカニズムの考察

多チャンネル表面筋電図は、表面で観測される電極間の差動増幅波形であり、電極下の多くの運動単位の干渉電位が観測されると考えた方が妥当である。従って、伝播波の伝播速度、振幅、波長に注目すれば、従来不可能であった詳細な筋収縮メカニズム（収縮に関与する運動単位の種類や数など）を考察できる。

その着想に基づき、**m-ch** 法を用いて伝播波を抽出し、伝播波パラメータ分布がトレーニングによって、どのように変化するかを調べた具体的な研究結果を図 2 に示す。図 2 は、伝播波パラメータ分布を、伝播波の伝播速度を横軸に、伝播波の振幅を縦軸にして、相対頻度分布を示したものである。手首に着けた同じ重さの負荷を、上腕二頭筋を収縮させて 30 回持ち上げるトレーニングを週 3 回行い、そのトレーニングを 4 週間行った結果である。左から 1、2、3、4 週間目の結果となっている。その特徴は白線で囲んだように、1 週目では伝播速度はばらつき、その振幅も小さいものが多かったが、トレーニングを続けることで、ある特定の伝播速度に集中し、その振幅が大きくなっている。以上のことから、トレーニングによって、ある特定の筋線維を使って運動するように筋肉の性質が変化しているのではないかと考察を行うことができた。

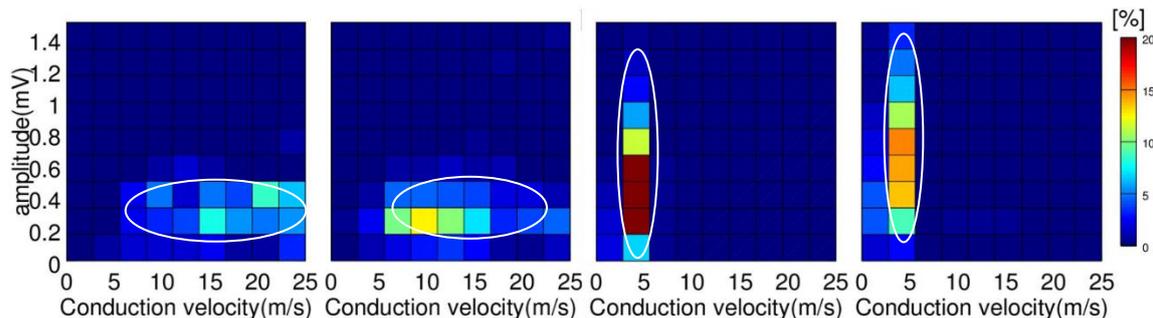


図 2 トレーニングによる伝播波の伝播速度と振幅の相対頻度分布の変化例

## 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、多チャンネル表面筋電図に関して、**m-ch** 法を使用して多チャンネル表面筋電図を解析し、定量的に抽出した伝播波に基づき、すべての伝播波の種々の伝播波パラメータ分布から、従来、考察できなかった筋収縮メカニズムを考察するために必要な特徴や特性を、多くの実験を通して明らかにすることである。また、その明らかにした特徴や特性が、スポーツやリハビリテーションなど多くの応用分野で簡単に使用し、役に立つデータとなるように測定電極の形状や信号増幅方法なども検討し、応用分野で簡単に使えるようにすることである。

(2) これらの目的を達成するために、以下の具体的な目的を設定した。

- ① スポーツで重視される筋肉は様々であり、どの筋肉でも同じような検討ができるか調べる。
- ② 測定に用いる電極の形状の違いによって、**m-ch** 法で抽出した伝播波の特徴に違いが表れるかを検討する。具体的には、電極の形（円形、棒状等）による影響を調査する。

## 3. 研究の方法

(1) 上記の具体的な目的①、②を達成するために、筋線維が平行に並び、筋全体の収縮方向と筋線維の収縮方向が同じである平行筋と、筋線維が羽状に広がり、筋全体の収縮方向と筋線維の収縮方向が異なる羽状筋を測定対象とした。具体的には、平行筋として上腕二頭筋を対象とし、羽状筋として下腿の腓腹筋を対象とした。特に羽状筋では、従来の電極で、伝播波が得難いため、電極形状が異なる種々の電極を作成し、伝播波が得易い電極を探ることにした。

(2) 従来、測定に用いていた電極は、棒状電極を一行に並べた図 3 左の梯子型電極と呼ばれるものである。電極の形状や並べ方で、得られる伝播波の波形は異なると考えられるが、定量的にその違いを示した研究は存在しない。そこで、図 3 中や右のような新電極 A、B を作成し、定量的

に伝播波の違いを観測した。図3中の新電極Aは、棒状電極を一行に並べたもの（棒状電極列、梯子型電極と同じ）と、円形電極を一行に並べたもの（円形電極列）とを、交互に入れ込んだものである。この新電極Aを使用し、同時刻で得られる伝播波を比較することで、電極形状の違いによる影響を定量的に検討できる。また、図3右の新電極Bは、筋線維方向の広がる羽状筋でも、伝播波が比較的容易に得られように、徐々に広がる円弧状電極を並べた形状の電極である。さらに、従来の図3左の梯子型電極との伝播波の違いを調べるため、その円弧上電極の間に、梯子状電極を2列組み込んだ構成となっている。



図3 従来の梯子型電極（左）、及び作成したふたつの新電極A（中）、B（右）

(3)上記(2)の結果を踏まえ、円弧状電極を発展させた図4左の新電極Cも開発した。この新電極Cの特徴は円弧状電極を複数方向に並べた構成をしている。また、図4中に示したスイッチで、隣り合う電極の短絡や開放を選択できるので、電極を貼付後でも、円弧状電極の幅を実質的に変える機能を持つ。この機能により、得られる伝播波の特性に円弧状電極の幅の変化が与える影響を考察できることになる。さらに、この電極を、図4右のような組み合わせで、測定チャンネルを設定した。この設定により、電極間を短絡（①-②&③-④短絡、及び全短絡）した場合、測定チャンネルには原理的に同じ信号が観測される。同じ信号が観測されるチャンネル同士を比較することで、雑音混入の影響を調べることが可能となり、雑音混入の影響がない測定チャンネルを選ぶことで雑音対策が可能になる。一方、全開放の場合は、4方向ごとに同時刻に得られる伝播波の特性を比較することができ、①-②&③-④短絡では、2方向ごとに同時刻に得られる伝播波の特性を比較することができる。

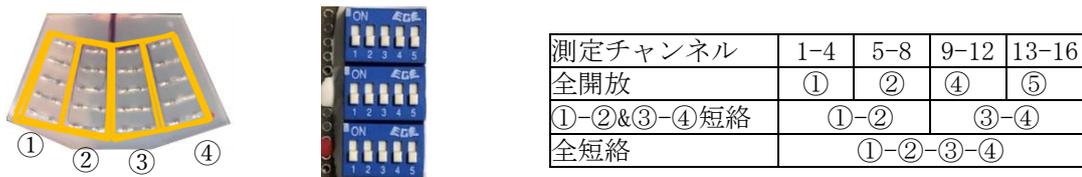


図4 新電極C（左：電極部分、中：開放短絡スイッチ、右：測定チャンネル設定）

(4)m-ch法を最大限有効に活用できるような多チャンネル電極の開発を行う。多チャンネル表面筋電図では、全てのチャンネルで雑音の混入がない筋電図波形が得られないと伝播波を正しく抽出できないことから、出来るだけ雑音の影響を抑える工夫が必要になる。

#### 4. 研究成果

##### (1)新電極Aから得られた研究成果

伝播波の比較結果を図5に示す。この図5から分かるように、棒状電極列では、図中央の1ch→3chで滑らかな伝播波が観測されているが、円形電極列では、図中央の1ch→3chで振幅が大きく変化し、伝播波と判定されない。また、棒状電極列では、16.245s以降の2ch→3chで伝播波が観測されるが、円形電極列では、16.245s以降の2ch→3chで伝播波が観測されない。以上のことから、伝播波が得易いのは棒状電極列であり、従来から使われている梯子型電極は伝播波が得易い特別な電極であることが明らかになった。当初、筋線維が羽状に広がる羽状筋に対し、円形電極をマトリクス状に配置した電極を使用することで、電極配置によらず伝播波が得られると考えていたが、円形電極を筋線維方向に並べても、伝播波が得難いことから、羽状筋にも対応できる新たな電極を開発する必要があることが明らかになった。

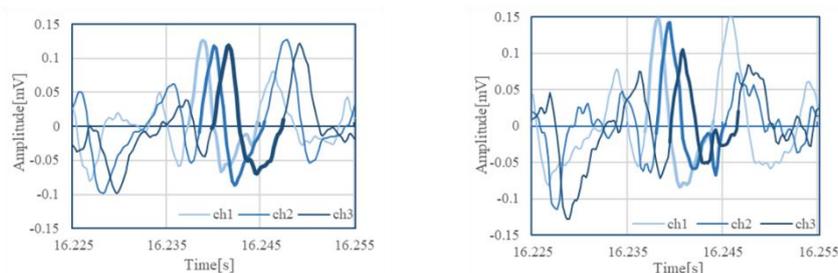


図5 新電極Aの伝播波の比較（左：棒状電極列、右：円形電極列）

### (2) 新電極 B から得られた研究成果

新電極 B を用いて、上腕二頭筋及び腓腹筋を対象に伝播波解析を行った。上腕二頭筋の伝播波解析から、円弧状電極の方が、得られる伝播波数が多いことが明らかになった。この理由として、発火タイミングが同じ場合、その干渉により伝播波が得られるので、電極下の筋線維数が多いほど、干渉が起き易くなり、その結果、伝播波が多く観測されたと考えられる。また、腓腹筋の伝播波解析から、梯子型電極で伝播波が得られない場合でも、円弧状電極では伝播波が得られており、筋線維方向が拡がり、一定方向ではない羽状筋においては、円弧状電極は伝播波を得られ易いことが明らかになった。以上のことから、従来の梯子型電極に代わり、円弧型電極を使用することで、どのような筋肉でも、伝播波が得られ易い可能性が明らかになった。

### (3) 新電極 C から得られた研究成果

上記の研究成果に基づき、開発したのが新電極 C である。この電極では、電極の形状を円弧型電極とし、その円弧型電極を複数方向用意した。また、電極間の開放短絡スイッチを使用し、その機能に併せて、測定チャンネル設定も複数用意したので、様々な電極の付加機能を試すことが可能となった。

最初に、全短絡条件で伝播波を測定した結果を図 6 に示す。この左右の図は、雑音の影響がなければ全く同じ伝播波となるはずであるが、右図 14ch の結果は、左図 6ch の結果に比べて明らかに異なる形になっている。このことから 14ch には雑音が混入した可能性が示唆できる。この雑音の影響は、伝播波を減らす原因にもなるので、雑音混入を防ぐ機能を付加する必要がある。

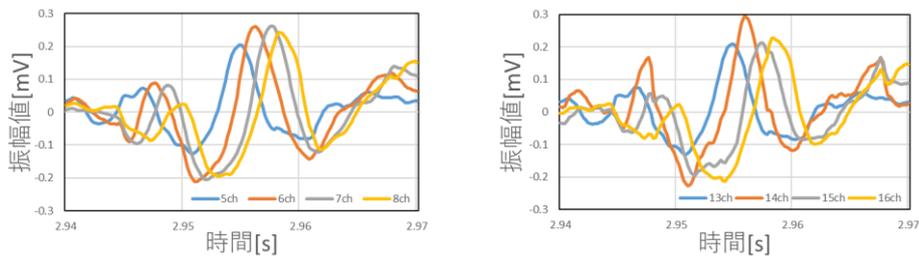


図 6 新電極 C の全短絡で得られる伝播波に含まれる雑音の影響

次に①-②&③-④短絡条件で伝播波を測定した結果 (①-②、③-④方向の違い) を図 7 に示す。この左右の図は、方向が違った場合の伝播波の違いを表しており、平行筋である上腕二頭筋であっても、同時刻に方向が異なると同じ形状の伝播波が得られないことから、筋線維の収縮は、筋肉全体で同期して収縮していないことが明らかになった。また方向が少しでも筋線維方向と違うと伝播波が発生し難いことも明らかになった。

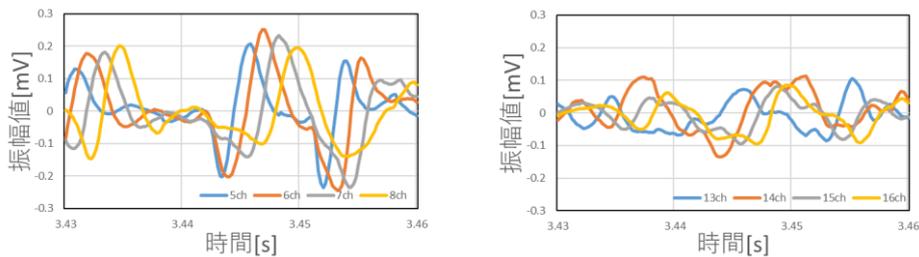


図 7 新電極 C の①-②&③-④短絡で得られる伝播波の違い (①-②、③-④方向、上腕二頭筋)

最後に全開放条件で伝播波を測定した結果 (①、②、③、④方向の違い) を図 8 に示す。この 4 つの図は、方向が違った場合の伝播波の違いを表しており、平行筋である上腕二頭筋であっても、僅かに方向が異なるだけで、同時刻に異なる伝播波が得られることから、図 7 の結果と併せて、筋線維は筋肉全体で同期して収縮していないことは明らかである。

今後は、以上の結果を踏まえ、研究方法の (4) の機能を満たす電極を開発していく予定である。

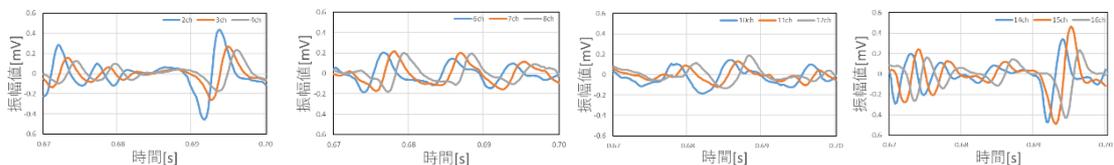


図 8 新電極 C の全開放で得られる伝播波の違い (①、②、③、④方向、上腕二頭筋)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 大倉康平、水野統太、Marzieh Aliabadi Farahani、松本悠佑、水戸和幸、板倉直明	4. 巻 141
2. 論文標題 異なる電極形状をもつ多チャンネル表面筋電図における伝播波解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 539-545
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejeiss.141.539	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Marzieh Aliabadi Farahani, Hiroki Yamada, Kota Akehi, Kazuyuki Mito, Tota Mizuno, Naoaki Itakura	4. 巻 24
2. 論文標題 Analysis of end-plate using multi-channel surface EMG	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 390-395
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-019-00531-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kohei Okura, Yu Matsumoto, Kazuyuki Mito, Tota Mizuno, Naoaki Itakura
2. 発表標題 Analysis of Conducting Waves Using Multichannel Surface EMG Based on Arc-Shaped Electrode
3. 学会等名 International Conference on Human-Computer Interaction(HCI 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大倉康平、松本悠佑、板倉直明、水戸和幸、水野統太
2. 発表標題 多チャンネル表面筋電図を用いた複数方向の電極における伝播波解析
3. 学会等名 電気学会計測知覚情報合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Okura, Marzieh Aliabadi Farahani, Yu Matsumoto, Kazuyuki Mito, Tota Mizuno, Naoaki Itakura
2. 発表標題 Analysis of Conducting Waves Using Multi-channel Surface EMG Based on Difference in the Electrode Shape
3. 学会等名 International Conference on Human-Computer Interaction(HCI 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Marzieh Aliabadi Farahani, Miki Haruna, Kota Akehi, Kazuyuki Mito, Tota Mizuno, Naoaki Itakura
2. 発表標題 Parameter change of propagating waves in dominant arms and non-dominant arms using multichannel surface electrogram
3. 学会等名 25th International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大倉康平、Marzieh Aliabadi Farahani、水戸和幸、水野統太、板倉直明
2. 発表標題 異なる電極形状をもつ多チャンネル表面筋電図における伝播波解析
3. 学会等名 IEEE主催2019年度第2回学生研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------